

УДК 669. 162

д.т.н. Новохатский А. М.,
к.т.н. Должиков В. В.,
к.т.н. Диментьев А. О.,
Падалка А. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ В ФУРМЕННОЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ВДУВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Скорректирована методика расчета теоретической температуры горения в фурменной зоне доменной печи, учитывающая влияние вдуваемых параллельно с пылеугольным топливом газов (кислорода, азота и метана) и химического состава угольной пыли, температуру и влажность дутья.

Ключевые слова: доменная печь, горн, теоретическая температура горения, пылеугольное топливо, кислород, азот, природный газ, температура и влажность дутья.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Одним из основных направлений развития доменного производства на металлургических предприятиях является строительство установок для получения и вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в горн доменной печи, что позволяет экономить кокс, полностью или частично заменить природный газ, стоимость которого за последние 20 лет значительно возросла.

В зависимости от вида вдуваемого топлива и его химического состава изменяется температура в фурменном очаге. С учетом ряда допущений такую температуру оценивают расчетным путем и называют теоретической температурой горения T_T . Она влияет на общее тепловое состояние

горна совместно с расходом кокса. Для расчета T_T предложено довольно много различных методик [1–6].

Необходимо отметить, что практически все методики максимально упрощены путем усреднения значений некоторых параметров, что обусловлено рядом причин (отсутствие данных, нацеленность на оценку изменений температуры и др.).

Изложение материала и его результаты.

Анализ отечественной литературы показывает [2, 3, 6], что для расчета теоретической температуры горения чаще всего (ПАО «АМК», ПАО «ЕМЗ», ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог») используют методику, предложенную Н. Е. Дунаевым и Т. И. Кухтиным [2]:

$$T_T = \frac{0,9341 \cdot t_d + 8208 \cdot \omega - \phi \cdot (2402 - 1,2177 \cdot t_d) - (1,9322 + 2,235 \cdot W_{жс}^p) \cdot S_{жс} +}{1 + \omega + 2 \cdot \phi + (0,0012 + 0,0013 \cdot W_{жс}^p) \cdot S_{жс} + 0,0005 \cdot S_{тв} + 2,026 \cdot S_2} + \frac{-(0,39 + 2,2175 \cdot c_{тв}^p) \cdot S_{тв} - 2673 \cdot S_2 + 94,76}{1 + \omega + 2 \cdot \phi + (0,0012 + 0,0013 \cdot W_{жс}^p) \cdot S_{жс} + 0,0005 \cdot S_{тв} + 2,026 \cdot S_2}, \quad (1)$$

где t_d — температура дутья, °С;
 ω — содержание кислорода в дутье на срезе воздушных фурм, м³/м³ сухого дутья;
 ϕ — влагосодержание дутья, м³/м³ сухого дутья;

$W_{жс}^p$ — рабочая теплота горения жидкого топлива, ккал/г;
 $S_{жс}$, $S_{тв}$ — расходы жидкого и твердого топлива в дутье соответственно, г/м³ сухого дутья;

$c_{тв}^p$ — содержание углерода в рабочей массе топлива, кг/кг;

S_c — расход газообразного топлива в дутье, m^3/m^3 сухого дутья.

Однако проведенный анализ показал, что в современных условиях металлургических предприятий ее целесообразно уточнить и скорректировать.

Для расчета количества тепла внесенного в доменную печь $1 m^3$ нагретого сухого дутья использовались данные о теплосодержании двухатомных газов указанные А.Н. Раммом [2]. При этом рассматривался интервал температур от 900 до 1100 °С, чего для современных промышленных условий недостаточно, так как на многих металлургических предприятиях устанавливают воздухонагреватели конструкции Калугина, которые способны нагревать дутье до 1200–1300 °С.

В связи с этим необходимо заменить предложенное выражение $0,9341 \cdot t_d + 94,76$, расположенное в числителе формулы (1), на подобное, которое получено на основании данных о теплосодержании двухатомных газов в интервале температур от 1000 до 1300 °С:

$$0,9489 \cdot t_d + 78,86.$$

В своей работе Рамм А.Н. отметил, что у азота и оксида углерода теплосодержание будет выше по сравнению с водородом: при температуре от 500 °С до 1000 °С на 3 %, а при 1000–2500 °С на 6 %, поэтому если содержание H_2 в фурменном газе превысит 10 %, то выражение для расчета количества тепла, внесенного сухим дутьем, изменится следующим образом:

$$0,9433 \cdot t_d + 79,4.$$

В формуле (1) для определения количества тепла, образующегося при горении топлива, предложен коэффициент 8208, который соответствует допущению, что температура кокса, поступающего на уровень воздушных фурм в доменной печи, равна 1500 °С. При наличии данных о на-

греве топлива целесообразно заменить его на выражение

$$6269,6 + 1,292 \cdot t_c,$$

где t_c — температура кокса, поступающего в фурменный очаг, °С.

В случае если температура кокса, поступающего в фурменный очаг, к примеру, увеличится на 100 °С, то теоретическая температура согласно формуле (1) повысится на 21 °С.

На современных металлургических предприятиях с целью интенсификации процесса горения ПУТ в доменной печи параллельно с угольной пылью подают кислород, в связи с чем увеличивается объем этого газа на $1 m^3$ сухого дутья, что можно рассчитать по формуле

$$\omega = \frac{\omega' \cdot V_d + \omega_{дон}}{V_d + \omega_{дон}},$$

где ω — содержание кислорода в дутье на срезе воздушных фурм, доля;

ω' — количество кислорода в нагретом дутье после воздухонагревателя, доля;

$\omega_{дон}$ — расход кислорода, подаваемого в воздушную фурму параллельно с ПУТ, $m^3/мин$;

V_d — расход дутья, $m^3/мин$.

Подаваемый кислород не нагревают до температуры дутья, а соответственно, тепло в доменную печь он не вносит. Поэтому в числитель формулы (1) необходимо добавить выражение

$$-(0,9489 \cdot t_d - 78,86) \cdot (\omega - \omega').$$

Предложенные коэффициенты перед расходом природного газа и ПУТ в знаменателе формулы (1) основаны на усредненных химических составах этих топлив. Проведенные расчеты теоретической температуры по формуле (1) с учетом влияния элементарного состава ПУТ показали, что при использовании разных марок углей целесообразно учитывать содержание водорода, азота и кислорода в угольной пы-

ли, поэтому вместо предложенного коэффициента в знаменателе перед $S_{мс}$ следует применить формулу

$$\kappa_{н\text{ит}} = (10,75 \cdot H_{мс} + 1,4 \cdot O_{мс} + 0,8 \cdot N_{мс} + 0,037) \cdot 10^{-3},$$

где $H_{мс}, O_{мс}, N_{мс}$ — содержание водорода, кислорода и азота в пылеугольном топливе, кг/кг ПУТ.

Для транспортировки пылеугольного топлива по трубопроводу используют газ, обычно это азот. Коэффициент перед расходом ПУТ этого не учитывает, поэтому его целесообразно заменить на выражение

$$T_T = \frac{0,9489 \cdot t_\delta + 8208 \cdot \omega - \phi \cdot (2402 - 1,2177 \cdot t_\delta) - (0,39 + 2,2175 \cdot c_{мс}^p) \cdot S_{мс} +}{1 + \omega + 2 \cdot \phi + (\kappa_{н\text{ит}} + N_{2\text{тр}}) \cdot 10^{-3} \cdot S_{мс} + 2,026 \cdot S_c} + \frac{-2673 \cdot S_c - (0,9489 \cdot t_\delta - 78,86) \cdot (\omega - \omega') + 78,86}{1 + \omega + 2 \cdot \phi + (\kappa_{н\text{ит}} + N_{2\text{тр}}) \cdot 10^{-3} \cdot S_{мс} + 2,026 \cdot S_c}. \quad (2)$$

С целью оценки влияния основных параметров (температура дутья, содержание в нем кислорода и влаги) на теоретическую температуру горения, полученную по формулам (1) и (2), были проведены расчеты. Исходные данные представлены в таблице 1, а результаты — в таблице 2.

Опираясь на данные в таблице 2, можно сделать вывод, что влияние основных параметров дутья на теоретическую температуру в обеих формулах практически одинаково.

$$(\kappa_{н\text{ит}} + N_{2\text{тр}}) \cdot 10^{-3},$$

где $N_{2\text{тр}}$ — азот, применяемый для подачи пылеугольного топлива в доменную печь, м³/кг ПУТ.

Химический состав природного газа оказывает влияние на объем образующихся газов в фурменном очаге, в связи с этим при его изменении необходимо пересчитывать коэффициент, указанный перед расходом в знаменателе формулы (1).

Обобщая все предложенные изменения в формуле (1) для расчета теоретической температуры горения при содержании водорода в фурменном газе менее 10 %, получим следующее выражение

Так как формулы (1) и (2) отличаются интервалом рассматриваемой температуры дутья, был проведен анализ ее влияния на T_T , результаты которого представлены в таблице 3.

Общая разность полученной теоретической температуры горения топлива, рассчитанная по формуле (1) и (2), при t_δ от 900 °С до 1300 °С составила 15 °С, что составляет 0,6 % от 2350 °С.

Таблица 1

Исходные данные для расчета теоретической температуры

t_δ	ω	ϕ	$S_{ж}$	$S_{мс}$	S_c	ω'	$N_{2\text{тр}}$	$c_{мс}^p$	$H_{мс}$	$O_{мс}$	$N_{мс}$
°С	м ³ /м ³	м ³ /м ³	г/м ³	г/м ³	м ³ /м ³	м ³ /м ³	м ³ /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
	су- хого ду- тья	су- хого ду- тья	сухо- го дутья	сухо- го дутья	су- хого ду- тья	су- хого ду- тья	ПУТ	ПУТ	ПУТ	ПУТ	ПУТ
1200°	0,23	0,01	—	80	—	0,01	0,75	0,7	0,04	0,078	0,017

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 2

Влияние параметров дутья на теоретическую температуру горения в доменной печи

Параметры дутья		Метод расчета	
		Формула (1), °С	Формула (2), °С
Базовый вариант		2278	2202
Изменения параметров	+0,01 м ³ /м ³ сухого дутья, ω	2324	2246
	ΔT _T	46	44
	+100 °С, t _ä	2351	2272
	ΔT _T	73	70
	+ 0,01 м ³ /м ³ сухого дутья, φ	2236	2164
	ΔT _T	-42	-38

Таблица 3

Влияние нагрева дутья на теоретическую температуру

№	Температура дутья, °С	Теоретическая температура, °С		
		Формула (1)	Формула (2)	Разность
1	900	2058	1994	64
2	1000	2131	2063	68
3	1100	2205	2133	72
4	1200	2278	2203	75
5	1300	2351	2272	79
Разность от 900 °С до 1300 °С		293	278	15

Разница базовых вариантов в таблице 2 составила 76 °С, поэтому были проведены расчеты теоретической температуры горения при различном количестве вдуваемого

ПУТ и соответствующем ему параллельно подаваемом кислороде, результаты которых представлены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние расхода ПУТ на теоретическую температуру горения в фурменной зоне

Расход ПУТ, г/м ³ дутья	Добавка кислорода с ПУТ, м ³ /м ³ сухого дутья	Теоретическая температура, °С		
		Формула (1)	Формула (2)	Разность
80	0,01	2278	2203	75
70	0,00875	2302	2234	68
60	0,0075	2326	2267	59
50	0,00625	2351	2300	51
40	0,005	2375	2334	41
30	0,00375	2400	2368	32
20	0,0025	2425	2404	21
10	0,00125	2450	2440	10
0	0	2475	2477	-2

Расчеты показали, что снижение расхода ПУТ приводит к уменьшению разности рассчитанной величины теоретической температуры по формуле (1) и (2). При этом основную роль в появлении разности играют вдуваемые параллельно кислород и газ, транспортирующий угольную пыль (азот).

Для транспортировки угольной пыли могут использовать природный газ, соответственно, в расчетах его расход увеличится на $0,75 \text{ м}^3/\text{кг}$ ПУТ. Опираясь на данные из таблицы 1 и указанные изменения, определили, что в этих технологических условиях теоретическая температура горения топлива в доменной печи составит 1996°C , что на 207°C меньше, чем при транспортировании азотом.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Скорректирована методика расчета теоретической температуры горения Н. Е. Дунаева и Т. И. Кухтина с учетом современных особенностей работы доменных печей и технологии вдувания пылеугольного топлива. Предложенная методика в основном отличается учетом влияния кислорода и азота, поступающих в металлургический агрегат вместе с пылеугольным топливом.

Влияние основных параметров дутья на теоретическую температуру, рассчитанную по формулам (1) и (2), практически одинаковое.

В основном полученная по этим методикам T_T отличается за счет расхода пылеугольного топлива, так как параллельно с ним обычно вдувают кислород для интенсификации горения угольной пыли и транспортирующий ее газ (чаще всего азот).

Библиографический список

1. Волков, Ю. П. *Технолог-доменщик: справочник [Текст]* / Ю. П. Волков, Л. Я. Шнарберг, А. К. Гусаров. — М.: Металлургия, 1986. — 263 с.
2. Дунаев, Н. Е. *Расчеты теоретической температуры фурменных газов в доменной плавке на дутье с добавками, обогащенном кислородом [Текст]* / Н. Е. Дунаев, Т. И. Кухтин // *Сталь*. — 1977. — №7. — С. 600–604.
3. *Доменное производство: Справочное издание: в 2-т.: Т.1. Подготовка руд и доменный процесс / под ред. Е.Ф. Вегмана [Текст]*. — М.: Металлургия, 1989. — 496 с.
4. Ефименко, Г. Г. *Металлургия чугуна [Текст]* / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. — К.: Вища школа, 1981. — 496 с.
5. Писи, Дж. Г. *Доменный процесс: теория и практика [Текст]* / Дж. Г. Писи, В. Г. Давенпорт. — М.: Металлургия, 1984. — 142 с.
6. Касим, Д. А. *Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива [Текст]* / Д. А. Касим, В. П. Лялюк, А. К. Тараканов, В. С. Листопадов, Д. В. Пинчук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2016. — № 2. — С. 38–43.

© Новохатский А. М.

© Должиков В. В.

© Диментьев А. О.

© Падалка А. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
нач. доменного цеха ЕМЗ, к.т.н. Кузнецовым А. М.*

Статья поступила в редакцию 13.06.17.

д.т.н. Новохатський О. М., к.т.н. Должиков В. В., к.т.н. Діментьєв О. О., Падалка О. В.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**ТЕОРЕТИЧНА ТЕМПЕРАТУРА ГОРІННЯ ФУРМЕНІЙ ЗОНІ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ПРИ
ВДУВАННІ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

Скориговано методику розрахунку теоретичної температури горіння в фурменій зоні доменної печі, яка враховує вплив газів, що вдуваються паралельно з пиловугільним паливом (кисню, азоту і метану), та хімічного складу вугільного пилу, температуру і вологість дуття.

Ключові слова: доменна піч, горн, теоретична температура горіння, пиловугільне паливо, кисень, азот, природний газ, температура і вологість дуття.

Doctor of Tech. Sc. Novohatskyi A. M., PhD Dolzhikov V. V., PhD Dimentiev A. O., Padalka A. V.
(DonSTU, Alchevsk, LPR)

**THEORETICAL COMBUSTION TEMPERATURE IN TUYERE OF THE BLAST FURNACE
AT PULVERIZED COAL INJECTION**

Design procedure has been adjusted for theoretical combustion temperature in tuyere of the blast furnace that consider influence of gases like oxygen, nitrogen and methane injected concurrently with pulverized coal fuel and chemical composition of coal dust, blast temperature and humidity.

Key words: blast furnace, hearth, theoretical combustion temperature, pulverized coal, oxygen, nitrogen, natural gas, blast temperature and humidity.